троля вибраций конструкций ГТД // Доклады Международной научно-технич. конференции, посвященной памяти Генерального конструктора аэрокосмической техники академика Н.Д.Кузнецова, 21-22 июня 2001 г. - Самара: Самар. науч. центр РАН, 2001. Ч.2. - с. 63 - 69.

4. Лиманова Н.И. Тестовый метод повышения точности измерений датчиков с нелинейными дробно-рациональными функциями преобразования // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - М.: НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ, 2000. №10. - с. 28 -31.
5. Лиманова Н.И. Проектирование датчиков со структурной избыточностью на основе новых информационных технологий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. М.: НАУЧТЕХЛИТИЗДАТ, 2003. №2. – с. 39 – 42.
6. Патент №2115896, МПК 6 G01 K 7/16. Преобразователь температуры/Н.И.Лиманова, Ю.Г. Козырев - Опубл. 20.07.98. Бюл. №20.

ОПТИМИЗАЦИЯ ЦИКЛА ГТУ

Иванов В.А.
ОАО “АВИАДВИГАТЕЛЬ”, г. Пермь

Обозначения: к - компрессор; т – турбина; L - работа; Q - подведенная теплота; η - коэффициент полезного действия (КПД); T - температура; p - давление; θ - степень повышения температуры в цикле; π - степень сжатия (расширения); к - показатель адиабаты; c_p – удельная теплоемкость; $\bar{R}$ – газовая постоянная; и – изотермный; а – адиабатный, окружающая атмосфера; с – сжатие; р – расширение; в - воздух; г - газ; е - эффективный; опт - оптимальный; макс – максимальный; 1-1 - простой цикл; 1 - первая (изотермная) ступень сжатия и расширения; 2 - вторая (адиабатная) ступень сжатия и расширения.

Оптимизация цикла, целью которой является повышение термического КПД, заключается в приближении конфигурации идеального (теоретического) цикла к форме цикла Карно (обычного или обобщенного). Повышение термического КПД приводит к повышению эффективного КПД цикла [1].

Известен способ оптимизации цикла Брайтона путем замены адиабатных процессов сжатия и расширения на изотермные. В результате получается обобщенный цикл Карно. Для достижения экономичности цикла Карно в таком обобщенном цикле при степени повышения давления меньшей бесконечности необходима регенерация теплоты отработавших газов.

В известном способе оптимизации не учитывалась установленная В.В. Уваровым закономерность повышения эффективного КПД цикла до максимума при замене изотермных процессов на изотермно – адиабатные с оптимальной по экономичности степенью изотермного сжатия и расширения [2].

В статье рассматривается оптимизация простого цикла ГТУ (цикла Брайтона) с учетом упомянутой закономерности и минимизации потерь энергии на необратимость рабочих процессов цикла, которая является другой возможностью повышения эффективного КПД цикла.

Введем обозначения: $\theta=T_г/T_a$; $\pi=\pi_{к1}\pi_{к2}=p_к/p_a$; $e=\pi^{(к-1)/к}$; $e_{к1}=\pi_{к1}^{(к-1)/к}$; $e_{к2}=\pi_{к2}^{(к-1)/к}$; $e_{т1}=\pi_{т1}^{(кг-1)/кг}$; $e_{т2}=\pi_{т2}^{(кг-1)/кг}$, где $к=к_в=1{,}4$.

В работе [2] получена формула для эффективного КПД (далее просто КПД) цикла с изотермно – адиабатным сжатием и расширением, который в литературе получил название изотермно – адиабатного:

$$\eta_{e.u.a}=\frac{L_{e.u.a}}{Q_{u.a}}=\frac{\theta[\eta_{т1}\ln e_{т1}+\eta_{т2}(1-\frac{1}{e_{т2}})]-\frac{1}{m}(\frac{\ln e_{к1}}{\eta_{к1}}+\frac{e_{к2}-1}{\eta_{к2}})}{(\theta-\frac{e_{к2}-1}{\eta_{к2}}-1)+\theta\,\eta_{т1}\ln e_{т1}}, \tag{1}$$

где $m=\dfrac{c_{pг}}{c_{pв}}=\dfrac{K_г}{K_г-1}\Big/\dfrac{K_в}{K_в-1}$ при $R_г\approx R_B$.

В работе [2] получены также формулы для параметров $e_{к1}$ и $e_{т1}$, соответствующих оптимальной по КПД степени изотермного сжатия и расширения в первой ступени изотермно – адиабатного цикла

$$e_{к1опт.\eta}=\frac{\eta_{к1}}{\eta_{к2}}e(1-m\,\eta_{e.u.a}), \tag{2}$$

$$e_{т1опт.\eta}=\frac{\eta_{т1}}{\eta_{т2}}e^{1/m}(1-\eta_{e.u.a}). \tag{3}$$

Далее для простоты примем условия $\eta_{к1}=\eta_{к2}=\eta_к$, $\eta_{т1}=\eta_{т2}=\eta_т$ и $m=1$, при которых, как видно из формул (2), (3), $e_{к1.опт.\eta}=e_{т1.опт.\eta}=e_{1.опт.\eta}$, и упомянутые формулы можно заменить одной:

$$e_{1опт.\eta}=e(1-\eta_{e.u.a}). \tag{4}$$

Рассмотрим зависимость КПД от степени повышения давления (СПД) в циклах с изотермно – адиабатным сжатием и расширением.

На рис. 1 показана зависимость КПД и параметров L и Q цикла с изотермно – адиабатным сжатием и расширением (полного изотермно – адиабатного цикла) и циклов с изотермно – адиабатным сжатием или расширением (частичных изотермно – адиабатных циклов) от СПД в этих циклах. Циклы имеют оптимальную по экономичности степень сжатия и расширения в первой ступени, соответствующую формуле (4).

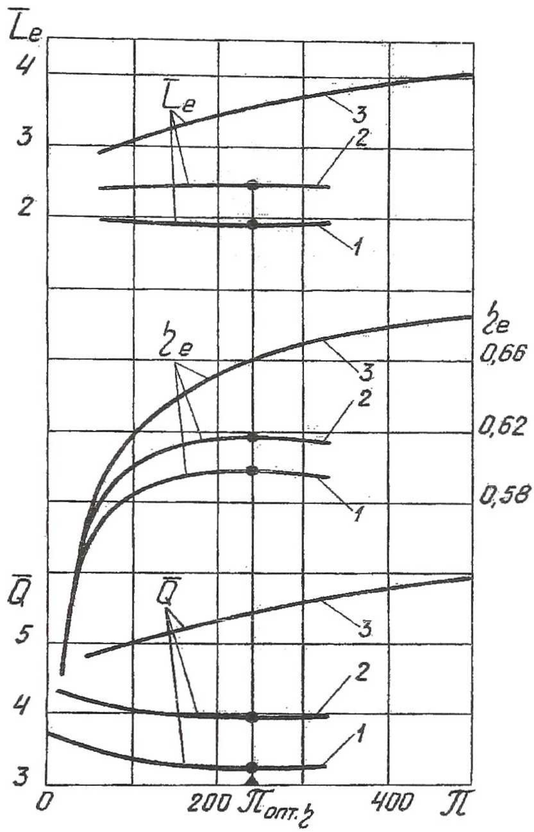

Рис. 1. Зависимость параметров изотермно – адиабатных циклов от степени повышения давления (θ=6; $\eta_к$=0,85; $\eta_т$=0,94): 1 – цикл с изотермно – адиабатным сжатием; 2 – цикл с изотермно – адиабатным расширением; 3 – цикл с изотермно – адиабатным сжатием и расширением

Как видно из рис. 1, КПД полного изотермно – адиабатного цикла монотонно возрастает с увеличением СПД и при СПД, равной бесконечности, находится по формуле

$$\eta_{е.и.а.\infty} = 1 - \frac{1}{\theta \eta_{к1} \eta_{т1}}, \tag{5}$$

полученной В.В. Уваровым в работе [2].

Из рис. 1 видно также, что максимум КПД и экстремум параметров L и Q частичных изотермно – адиабатных циклов достигается при одинаковой оптимальной СПД $\pi_{опт.\eta}$. Найдем эту СПД.

Вначале рассмотрим цикл с изотермно – адиабатным сжатием. Подставив $e_{т1}$=1 в формулу (1), получим формулу эффективного КПД этого цикла

$$\eta_{е.и.а.с} = \frac{\overline{L}_{е.и.а.с}}{\overline{Q}_{и.а.с}} = \frac{\theta\eta_{т}(1-\frac{1}{e}) - \frac{\ln e_{к1}}{\eta_{к}} - \frac{e_{к2}-1}{\eta_{к}}}{(\theta - \frac{e_{к2}-1}{\eta_{к}} - 1)} \qquad (6)$$

Подставив формулу $e_{к1\ опт.\eta}=e(1-\eta_{е.и.а.с})$, аналогичную формуле (4), и равенство $e_{к2}=e/e_{к1}$ в формулу (6), получим формулы относительной работы $(\overline{L}_e = L_e/(C_pT_a))$ и подведенной теплоты $(\overline{Q} = Q/(C_pT_a))$ цикла с оптимальными по экономичности параметрами. Дифференцируя полученные формулы по параметру e и приравнивая производную к нулю, получим уравнения

$$\frac{d\overline{L}_{е.и.а.с}}{de} = \frac{\theta\eta_{т}}{e^2} - \frac{1}{e\eta_{к}} - \frac{1}{(1-\eta_{е.и.а.с})\eta_{к}}(-\frac{d\eta_{е.и.а.с}}{de}) + \frac{1}{(1-\eta_{е.и.а.с})^2\eta_{к}}(-\frac{d\eta_{е.и.а.с}}{de}) = 0$$

$$\frac{d\overline{Q}_{и.а.с}}{de} = \frac{1}{(1-\eta_{е.и.а.с})^2\eta_{к}}(-\frac{d\eta_{е.и.а.с}}{de}) = 0$$

Если экстремум параметров $L_{е.и.а.с}$ и $Q_{и.а.с}$ достигается при одном значении параметра e, при котором, как следствие, достигается также максимум КПД цикла и производная $d\eta_{е.и.а.с}/de=0$, то полученные уравнения сведутся к одному уравнению

$$\frac{\theta\eta_{т}}{e^2} - \frac{1}{e\eta_{к}} = 0$$

решением которого является значение параметра e, оптимальное по КПД цикла

$$e_{опт.\eta} = \theta\eta_{к}\eta_{т}. \qquad (7)$$

Затем рассмотрим цикл с изотермно – адиабатным расширением. Подставив $e_{к1}=1$ в формулу (1), получим формулу эффективного КПД этого цикла

$$\eta_{е.и.а.р} = \frac{\overline{L}_{е.и.р}}{\overline{Q}_{и.а.р}} = \frac{\theta\eta_{т}[\ln e_{т1} + (1-\frac{1}{e_{т2}})] - \frac{e-1}{\eta_{к}}}{(\theta - \frac{e-1}{\eta_{к}} - 1) + \theta\eta_{т}\ln e_{т1}}. \qquad (8)$$

Подставив формулу $e_{т1\ опт.\eta}=e(1-\eta_{е.и.а.р})$, аналогичную формул (4), и равенство $e_{т2}=e/e_{т1}$ в формулу (8), получим формулы относительной работы и подведенной теплоты цикла с оптимальными по экономичности параметрами. Дифференцируя полученные формулы по параметру е и приравнивая производную к нулю, получим уравнения

$$\frac{d\overline{L}_{е.и.а.р}}{de} = \theta\eta_т\left[\frac{1}{e} + \frac{1}{(1-\eta_{е.и.а.р})}\left(-\frac{d\eta_{е.и.а.р}}{de}\right) + \frac{d\eta_{е.и.а.р}}{de}\right] - \frac{1}{\eta_к} = 0,$$

$$\frac{d\overline{Q}_{и.а.р}}{de} = -\frac{1}{\eta_к} + \theta\eta_т\left[\frac{1}{e} + \frac{1}{(1-\eta_{е.и.а.р})}\left(-\frac{d\eta_{е.и.а.р}}{de}\right)\right] = 0.$$

Если экстремум параметров $L_{е.и.а.р}$ и $Q_{и.а.р}$ достигается при одном значении параметра е, при котором, как следствие, достигается также максимум КПД цикла и производная $d\eta_{е.и.а.р}/de=0$, то полученные уравнения сведутся к одному уравнению

$$\frac{\theta\eta_т}{e} - \frac{1}{\eta_к} = 0,$$

решением которого, является значение параметра е, соответствующее формуле (7).

Заметим, что оптимальная СПД, при которой достигается максимум КПД частичных изотермно – адиабатных циклов, является также максимальной для простого цикла $\pi_{макс}=(\theta\eta_к\eta_т)^{к/(к-1)}$, так как при этой СПД работа и КПД простого цикла обращаются в нуль [3].

На рис. 2 показаны T – S диаграммы изотермно – адиабатных циклов. Как видно из рис. 2, достижение упомянутого максимума КПД объясняется тем, что в цикле с изотермно – адиабатным расширением (рис.2, а) при максимальной СПД подвод теплоты производится в основном по изотерме, а по изобаре подводится минимальное количество теплоты, необходимое для существования простого цикла (для преодоления потерь). В цикле с изотермно – адиабатным сжатием (рис.2, б) отвод теплоты производится также по изотерме и изобаре. Изотермные процессы обеспечивают повышение КПД этих циклов до максимума. Максимум КПД первого цикла превышает максимум КПД второго, так как в последнем подвод теплоты по изобаре значительно больше минимального.

В отличие от частичных циклов полный изотермно – адиабатный цикл (рис. 2, в) имеет два изотермных процесса (отвода и подвода теплоты) и соответственно более высокий КПД и по форме является обычным циклом Карно с двумя срезанными углами.

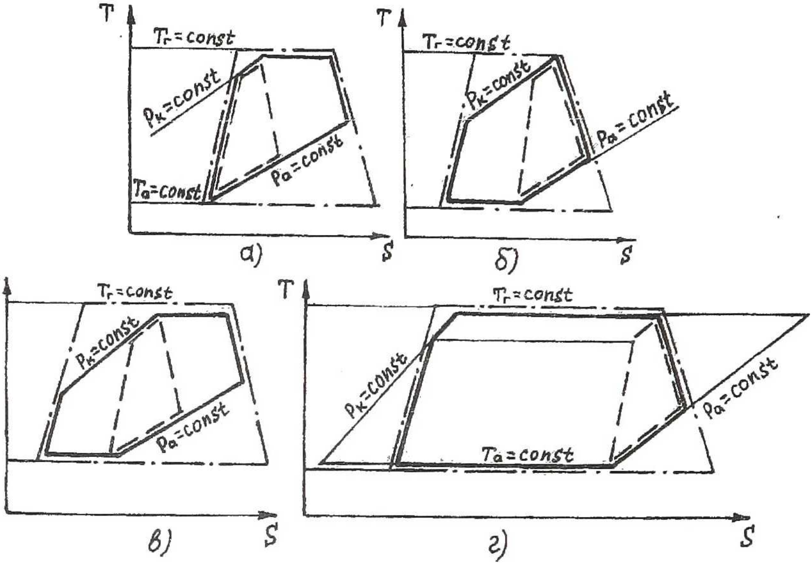

Рис. 2. T – S диаграммы изотермно – адиабатных циклов:
а – цикл с изотермно – адиабатным расширением при $\pi_{макс}$; б – цикл с изотермно – адиабатным сжатием при $\pi_{макс}$; в – цикл с изотермно – адиабатным сжатием и расширением при $\pi_{макс}$; г – обобщенный цикл и цикл с изотермно – адиабатным сжатием и расширением при $\pi=\infty$; ‒ ‒ ‒ ‒простой цикл; ▬▬ изотермно – адиабатный цикл; ── • • обычный цикл Карно; ─── обобщенный цикл Карно

Тогда, для оптимизации простого цикла ГТУ необходимо заменить адиабатные процессы сжатия и расширения на оптимальные по экономичности изотермно – адиабатные процессы и в последних обеспечить максимальное увеличение подвода и отвода теплоты по изотерме за счет уменьшения подвода теплоты по изобаре до минимального, как в простом цикле с максимальной СПД.

Заметим, что в полном изотермно – адиабатном цикле при θ = const и увеличении СПД параметры $\eta_{е.и.а}$ и $e_{к2}=1/(1-\eta_{е.и.а})$ увеличиваются, а подвод теплоты по изобаре соответственно уменьшается. Тогда найдем СПД (параметр е), при которой этот подвод тепла становится минимальным. С этой целью запишем уравнение, соответствующее равенству теплоты, подведенной по изобаре в простом и полном изотермно – адиабатном цикле $Q_{1\text{-}1\,min}=Q_{и.а.с}$ при $\eta_{к1}=\eta_{к2}=\eta_к$

$$\theta - 1 - \frac{e_{1-1} - 1}{\eta_к} = \theta - 1 - \frac{e\ / e_{к1} - 1}{\eta_k}.$$

Подставив в полученное уравнение равенства $e_{1-1}=e_{макс}=\theta\eta_к\eta_т$ и $e_{к1}=e(1-\eta_{e\ и.а})$ и решив его относительно параметра $\eta_{е.и.а}$, получим известное выражение (5) для КПД изотермно – адиабатного цикла при СПД равной бесконечности. Тогда, искомая СПД равна бесконечности.

Далее сравним экономичность и форму циклов, оптимизированных известным и рассматриваемым способом, при постоянном параметре θ и увеличении СПД до бесконечности. С этой целью вначале найдем КПД обобщенного цикла при известном способе оптимизации и упомянутых условиях θ = const и $\pi = \infty$:

Подставив равенства $e_{к1}=e$, $e_{т1}=e^{1/m}$ (при которых $e_{к2}=e_{т2}=1$) в формулу (1), найдем

$$\eta_{е.об} = \frac{\theta\eta_{т1}\ln e^{1/m} - \frac{1}{m}\ln e\ /\eta_{к1}}{\theta - 1 + \theta\eta_{т1}\ln e^{1/m}}$$

Разделив числитель и знаменатель полученной формулы на $\theta\eta_{т1}\ln e/m$, получим формулу КПД обобщенного цикла

$$\eta_{е.об} = \frac{1 - \dfrac{1}{\theta\eta_{к1}\eta_{т1}}}{\dfrac{\theta - 1}{\theta\eta_{т1}\ln e/m} + 1} \qquad (9)$$

Из формулы (9), приняв e = ∞, найдем искомый КПД

$$\eta_{е.об.\infty} = 1 - \frac{1}{\theta\eta_{к1}\eta_{т1}}. \qquad (10)$$

Из сравнения формул (5) и (10) следует, что полный изотермно – адиабатный цикл и обобщенный цикл при СПД, равной бесконечности, имеют одинаковый КПД

$$\eta_{е.иа.\infty} = \eta_{е.об.\infty} = \eta_{е.\infty},$$

который при минимизации потерь энергии на необратимость процессов сжатия и расширения приближается к КПД цикла Карно и в пределе при $\eta_к=\eta_т=1$ совпадает с ним.

Затем покажем, что полный изотермно – адиабатный цикл при СПД, равной бесконечности, по форме практически совпадает с обычным циклом Карно.

Как видно из T – S диаграммы (рис. 2, г), при этой СПД с учетом $e_{к1}=e_{т1}$ и минимального подвода теплоты по изобаре процессы расширения по адиабате в полном изотермно – адиабатном и простом циклах совпадают и полный изотермно – адиабатный цикл по форме является обычным циклом Карно с срезанным нижним углом. Влияние последнего на форму изотермно – адиабатного цикла уменьшается при минимизации потерь энергии на необратимость процессов сжатия и расширения и в пределе при $\eta_к$=$\eta_т$=1 изотермно – адиабатный цикл превращается в обычный цикл Карно. Тогда, при СПД, равной бесконечности, полный изотермно – адиабатный и обобщенный циклы эквивалентны.

Далее рассмотрим возможность оптимизации цикла Брайтона при умеренной СПД, меньшей бесконечности (рис. 2,в). На рис. 3 показана зависимость КПД сравниваемых циклов от СПД при θ = const.

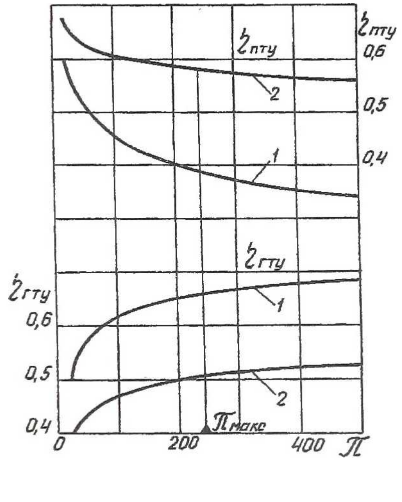

Рис. 3. Зависимость КПД ГТУ и ПТУ в составе ПГУ от степени повышения давления при условии $\eta_{пгу}$=1-1/$\theta\eta_к\eta_т$ (θ=6; $\eta_к$=0,85;$\eta_т$=0,94):

1 – полный изотермно – адиабатный цикл ГТУ; 2 – обобщенный цикл ГТУ

Как видно из рис. 3, при умеренной СПД КПД полного изотермно – адиабатного цикла значительно выше КПД обобщенного цикла.

В ПГУ с сравниваемыми циклами возможно достижение КПД $\eta_{e.\infty}$ при умеренной СПД путем использования теплоты отработавших газов вне цикла, так как регенерация внутри полного изотермно – адиабатного цикла невозможна из-за отрицательной разности температур газа и воздуха в регенераторе. Использование теплоты отработавших газов вне цикла, применяемое на практике в энергетических установках, возможно, например, в простейшей парогазовой установке (ПГУ), включающей газотурбинную (ГТУ) и паротурбинную (ПТУ) установку с котлом утилизатором (КУ) и паровой турбиной (ПТ) (рис. 4). Г.Г.Ольховским получена формула для общего КПД такой ПГУ [4]:

$$\eta_{ПГУ} = \eta_{ГТУ} + (1 - \eta_{ГТУ})\eta_{ПТУ}, \tag{11}$$

где $\eta_{пту}$=$\eta_{ку}\eta_{е.пту}$ - КПД паротурбинной установки.

Как видно из формулы (11), увеличивая КПД ПТУ можно повысить КПД ПГУ и также, как при полной регенерации внутри обобщенного цикла, обеспечить равенство $\eta_{пгу}$=$\eta_{е.\infty}$ при умеренной СПД.

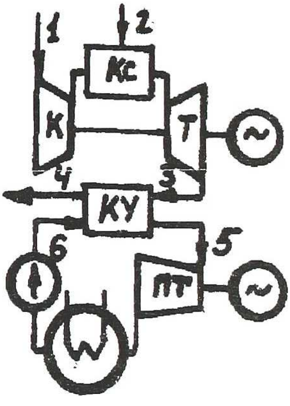

Рис. 4. Схема простейшей парогазовой установки: 1 – воздух из атмосферы; 2 – топливо; 3 – отработавшие в турбине газы; 4 – уходящие газы; 5 – свежий пар; 6 – питательная вода

На рис.3 показано также изменение КПД ПТУ от СПД в ПГУ с сравниваемыми циклами. Величина КПД ПТУ рассчитана по формуле

$$\eta_{ПТУ} = 1 - \frac{1}{\theta \eta_{K1} \eta_{T1} (1 - \eta_{ГТУ})}, \qquad (12)$$

полученной из формулы (11) при условии равенства $\eta_{птy}=\eta_{e.\infty}$. Формула (12) справедлива при любой форме цикла ГТУ.

Сравним эффективность достижения КПД $\eta_{e.\infty}$ в ПГУ с обобщенным и полным изотермно – адиабатными циклами ГТУ при умеренной СПД, максимальной для простого цикла.

Как видно из рис.3, достижение КПД $\eta_{e\infty}$ в случае использовании в ГТУ полного изотермно – адиабатного цикла с максимальным КПД обеспечивается при минимальном КПД ПТУ ($\eta_{пту}$ = 0,38 при $\pi_{макс}$ = 240) и реальных значениях входящих в него величин ($\eta_{ку}$ = 0,85, $\eta_{e.пту}$ = 0,45), а в случае использования в ГТУ обобщенного цикла с более низким КПД - при значительном увеличении КПД ПТУ ($\eta_{пту}$ = 0,58 при $\pi_{макс}$ = 240), что нереально даже в перспективе.

Тогда при оптимизации цикла ГТУ с использованием тепла отработавших газов вне цикла для достижения КПД цикла Карно при умеренной СПД необходимо использовать в ГТУ не обобщенный, а полный изотермно – адиабатный цикл, имеющий более высокий КПД, и минимизировать потери энергии на необратимость рабочих процессов цикла.

Список литературы

1. Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение. 1984. 592с.
2. Уваров В.В. Газовые турбины и газотурбинные установки. М.: Высшая школа. 1970. 320с.
3. Теория воздушно-реактивных двигателей. Под ред. С.М.Шляхтенко. М.: Машиностроение. 1987. 568с.
4. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат. 1985. 304с.